

## MODELIZACIÓN CLIMÁTICA: UNA APLICACIÓN PRÁCTICA EN GALICIA

R. ZAS & C. ACEVEDO

Centro de Investigaciones Forestales y Ambientales de Lourizán. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. email: [rzas@sfp.cifl.cesga.es](mailto:rzas@sfp.cifl.cesga.es)

### RESUMEN

Se presenta los resultados preliminares de una modelización climática realizada en Arcview 3.1 para la estimación de temperaturas medias mensuales y precipitaciones mensuales en cualquier punto y fecha en Galicia. Esta modelización consiste en una sectorización del territorio gallego en zonas de variación homogénea de la temperatura y precipitación con el desnivel altitudinal y latitudinal. La sectorización, basada en el mapa de cuencas hidrográficas E 1:200.000, se realizó buscando optimizar los coeficientes de correlación entre la altura y el parámetro climático mediante técnicas de correlación espacial. Se presenta la metodología utilizada y se analiza la eficacia del modelo propuesto mediante la comparación de datos reales y estimados en las estaciones meteorológicas. Según la sectorización espacio-temporal propuesta el gradiente térmico vertical varía entre  $-0.3$  y  $-1.3$  °C /100 m de desnivel y el gradiente térmico latitudinal varía entre  $-5$  y  $+7$  °C/100 Km. El gradiente pluviométrico vertical medio es de 37 mm trimestrales/100 m, variando entre 16 mm/100 m en verano y 61 mm/100 m en invierno. Tanto en la estimación de temperaturas como de precipitaciones el modelo propuesto mejora las estimaciones notablemente respecto a los métodos convencionales.

**P.C.:** Clima, temperatura, precipitación, modelización, Galicia

### SUMMARY

Preliminary results of a climate model for estimating monthly mean temperatures and precipitation in any point of Galicia (NW Spain) are presented. The model is based in a geographical division of Galicia's territory in stratum with homogeneous temperature-altitude and precipitation-altitude relations. This geographical stratification was carried out on the basis of the hydrologic basins map 1:200.000, looking for maximise the correlation between the altitude and the climate parameter using spatial correlation techniques. The methodology used is presented and the model efficiency is analysed by comparing real and estimated data in the weather stations. On the basis of the spatial and temporal stratification proposed, the vertical temperature gradient varies between  $-0.3$  and  $-1.3$  °C/100 m and the latitudinal temperature gradient varies between  $-5$  and  $+7$  °C/100 Km. The mean quarterly vertical precipitation gradient was 37 mm/100 m, varying between 16 mm/100 m in summer and 61 mm/100 m in winter. The model showed an important improvement in the estimation of monthly mean temperatures and precipitation in relation to the conventional methods.

**K.W.:** Climate, temperature, precipitation, model, Galicia

### INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se resume la metodología y resultados básicos del Modelo de Estimación de temperaturas medias y precipitaciones mensuales en Galicia (CLIMGA) desarrollado en el Sistema de Información Geográfica ArcView 3.1, el sistema de bases relaciones Access 97 y el sistema de análisis de datos SAS System. La descripción detallada del mismo puede verse en el Proyecto Fin de Carrera "Modelización climática para el seguimiento de las repoblaciones en tierras agrarias en Galicia", presentado por C. Acevedo en la Escuela Politécnica Superior de Lugo, Universidad de Santiago de Compostela en junio del 2000.

## MATERIAL Y MÉTODOS

**Material de partida.** El modelo propuesto utiliza 155 estaciones meteorológicas del territorio gallego pertenecientes a la red de estaciones del Centro de Investigaciones Forestales y Ambientales de Lourizán, a la red del Centro Meteorológico Territorial de Galicia (Instituto Nacional de Meteorología) y a la red pluviométrica de Iberdrola. Las estaciones fueron seleccionadas en función de los siguientes criterios: <sup>1</sup> Mínimo de 5 años consecutivos de observaciones, <sup>2</sup> Observaciones incluidas en el período “normal” (1970-1999) y <sup>3</sup> Existencia de datos para los años 1995-2000.

**Estimación de datos no registrados.** Para poder hacer un mejor seguimiento de las series y a su vez darle más versatilidad al modelo, se desarrolló un programa informático en lenguaje SAS (SAS, 1990) que estima los valores no registrados de las series anuales de las estaciones utilizadas en este estudio. El programa se basa en las regresiones entre los valores del parámetro de la estación problema y las estaciones de su contorno. Para ello, hay que partir de la idea de que tanto la temperatura como la precipitación se pueden tratar como variables regionalizadas, es decir, que presentan correlación espacial (GRIFFITH & AMRHEIN, 1997) y que los valores que toman en puntos próximos se asemejan más que en puntos distantes.

De forma secuencial, el proceso seguido para una estación problema “EP” con una laguna en un determinado mes y año, es el siguiente: <sup>1</sup> Se determinan las correlaciones de las temperaturas o precipitaciones del mes problema entre la estación “EP” y el resto de las estaciones; <sup>2</sup> De todas las estaciones, se seleccionan las que guardan la mejor correlación ( $r^2 \geq 0,95$ ) con la estación problema. Estas estaciones son las únicas que se utilizan en los análisis; <sup>3</sup> A continuación se calculan las rectas de regresión de las relaciones anteriores para cada estación con buena correlación con la estación problema; <sup>4</sup> Con los valores reales de estas estaciones en el mes con laguna se estiman, mediante las rectas de regresión, el dato que falta en la estación problema; <sup>4</sup> Para terminar, se calcula la media ponderada a la inversa de las distancias entre la estación problema y las estaciones a partir de las cuales se estiman los datos. Se repite reiterativamente para todas las estaciones que dispongan de lagunas en sus series climatológicas. El proceso se repite disminuyendo la restricción del coeficiente de correlación de 0.95 a 0.90.

**Normalización de medias.** Las medias en el tiempo de un parámetro climático presentan fluctuaciones según el período de mediciones considerado; a medida que éste se alarga, las oscilaciones son cada vez menores, y cuando el valor medio se estabiliza se denomina ‘normal’ (CARBALLEIRA *et al.*, 1983). Tal como estos últimos autores recomiendan, todo estudio climático que utilice valores medios de series anuales heterogéneas (estaciones con datos en distintos períodos) requiere una normalización de estas medias que minimice las posibles variaciones a lo largo de los años. A efectos prácticos se considera como período normal series de 30 años y, aunque el período normal oficial es 1961-1990 (CARBALLEIRA *et al.*, 1983), se ha empleado en el presente estudio, el período 1970-1999 con el fin de disponer de una mayor longitud en las series de datos y mayor número de estaciones.

Para ambos tipos de datos (termométricos y pluviométricos), se han considerado como estaciones normales aquellas que poseen todos los datos del período “normal” y las que se aproximen a él (con datos de 25 a 30 años dentro del período normal). Siguiendo a ELIAS & CASTIVELLI (1996), para la normalización de la temperatura se eligió el método de las diferencias, mientras que para los datos pluviométricos se optó por el método de los cocientes. En el presente trabajo, se han considerado como normales 21 estaciones térmicas y 24 pluviométricas. Para el resto de estaciones, los valores normales se calcularon como la media de las normalizaciones realizadas a partir de cada estación normal. Para ello se escribió una subrutina en lenguaje SAS (SAS, 1990).

**Sectorización del gradiente térmico y pluviométrico vertical.** Se pretende realizar una sectorización del territorio gallego en zonas homogéneas de comportamiento climático. Para ello se partió del mapa de las cuencas hidrográficas principales de Galicia. Este mapa se digitalizó en AutoCad R.14 a partir de la serie 1:200.000 del Instituto Nacional Geográfico, siguiendo la agrupación de cuencas descrita en MARTÍNEZ *et al.* (1994). El mapa CAD resultante se exportó al

sistema de información geográfica ArcView 3.1, generándose el tema de polígonos base para la elaboración de las distintas sectorizaciones.

Las estaciones meteorológicas de las distintas cuencas hidrográficas se fueron agrupando para crear zonas con comportamiento climático afín, basándose en análisis de regresión entre las temperaturas medias y precipitaciones trimestrales (primavera, verano, otoño e invierno) con la altura de cada estación. Para optimizar estas correlaciones mediante una adecuada sectorización se desarrolló un programa informático en lenguaje SAS (SAS, 1990) que asigna a cada estación el coeficiente de correlación entre la temperatura o precipitación trimestral con la altura, considerando únicamente las estaciones meteorológicas más próximas a ella. Este programa se basa en un bucle reiterativo que selecciona, para cada estación, las  $n$  estaciones más próximas en función de la matriz triangular de distancias entre todas las estaciones. Con el conjunto de estaciones seleccionadas se analiza la regresión entre la temperatura o precipitación trimestral con la altura y se almacena el coeficiente de correlación resultante y el parámetro 'b' de la recta de regresión (gradiente vertical) para cada estación. Estos resultados se exportaron a ArcView 3.1 y se generó un tema de puntos (estaciones), representándose éstas según una graduación de color en función del coeficiente de correlación. La agrupación geográfica de puntos con altos índices de correlación indica zonas de comportamiento climático semejante respecto a la variación de la temperatura o precipitación con la altura. Los sectores se determinaron acomodando estas zonas homogéneas a los límites de las cuencas hidrográficas.

De esta manera se procedió variando el número de estaciones próximas desde 50 hasta 5. Considerando un número elevado de estaciones vecinas los coeficientes resultantes son más bajos (disminuye la correlación espacial al aumentar la superficie considerada) y existen pocas estaciones con coeficientes de correlación aceptables. Estos pocos casos son los que determinan los sectores más amplios. A medida que se reduce el número de estaciones vecinas consideradas, los coeficientes de correlación aumentan y los sectores resultantes disminuyen de tamaño. Los sectores se determinaron buscando un tamaño máximo manteniendo un coeficiente de correlación ( $r^2$ ) superior a 0.70 para las temperaturas y superior a 0.60 para las precipitaciones.

En el caso de las temperaturas, estas regresiones se ajustaron de nuevo, incluyéndose la latitud como variable dependiente (modelo:  $T = \mu + H + UTM_y \pm \varepsilon$ , para cada sector).

El resultado final de esta sectorización es la creación de 8 mapas (temas ArcView de polígonos) según el gradiente térmico y pluviométrico vertical (en primavera, verano, otoño e invierno), cuatro para la termometría y cuatro para la pluviometría. Las tablas asociadas a estos ocho temas tienen un registro por sector y los siguientes campos: Sector,  $r^2$ , a y b.

**Estimación de temperaturas medias y precipitaciones mensuales.** La metodología seguida para la estimación de las temperaturas y precipitaciones mensuales en un punto P es la siguiente: <sup>1</sup> Primeramente se determinan los 8 sectores a los que pertenece el punto P; <sup>2</sup> De forma independiente para cada trimestre, se estiman las temperaturas y precipitaciones mensuales en el punto P a partir de los valores de éstos parámetros en las estaciones del sector al que pertenece P y el desnivel y diferencia de latitud entre cada estación y el punto P. En el caso de las temperaturas, la estimación, para cada estación del sector, sería:

$$T_{\text{estimada por la estación } n} = T_{\text{estación } n} + b \cdot (H_{\text{parcela}} - H_{\text{estación } n}) + c \cdot (Y_{\text{parcela}} - Y_{\text{estación } n})$$

siendo b y c los parámetros de la ecuación de regresión para el sector al que pertenece el punto P, H la altura en metros e Y la latitud en km; <sup>3</sup> De esta manera se obtienen tantas estimaciones del parámetro como estaciones existan en el sector. La estimación final del parámetro es la media ponderada a la inversa de la distancia (punto P-estación) de las estimaciones realizadas por cada una de las estaciones existentes en el sector en el que se encuentra el punto problema.

**Eficacia del modelo:** El modelo propuesto se ha testado mediante la comparación de los errores cometidos en las estimaciones de las temperaturas medias y precipitaciones mensuales del año

1996 en todas las estaciones meteorológicas, utilizando el modelo propuesto y mediante métodos convencionales. Para cada estación, la estimación convencional se realizó a partir de la precipitación y temperatura media mensual en la estación más cercana, corrigiendo las temperaturas según el gradiente térmico vertical estándar de  $-0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$  (AGUILÓ *et al.*, 1991).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procedimiento de sectorización funcionó bien para la mayoría de las cuencas hidrográficas definidas, especialmente en el caso de las temperaturas. Sin embargo, en muchas cuencas, el comportamiento de las estaciones meteorológicas que alberga no es uniforme, haciéndose necesario la subdivisión en subcuencas con buen índice de correlación. Esta subdivisión se realizó en el sistema ArcView en función del mapa de ríos y curvas de nivel escala 1:250.000.

En la sectorización del gradiente térmico se delimitaron 8, 12, 7 y 8 sectores para primavera, verano, otoño e invierno respectivamente. El coeficiente de correlación medio fue de  $r^2 = 0,83$ . El gradiente térmico vertical, según la sectorización espacio-temporal propuesta, varía entre  $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de desnivel, con un valor medio de  $-0,58\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . CARBALLEIRA *et al.* (1983) encuentran valores semejantes, con una oscilación de  $-0,38$  a  $-0,78$  y un valor medio de  $-0,59\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ . El valor estándar, comunmente aceptado, es de  $-0,55\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  (AGUILÓ *et al.*, 1991), similar al valor medio encontrado en ambos trabajos. El gradiente térmico altitudinal es máximo en invierno ( $-0,66\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ) y mínimo en verano ( $-0,46\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ). El gradiente térmico latitudinal es mucho más variable, oscilando entre  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ Km}$  y  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ Km}$  de incremento de latitud, con un valor medio de  $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ Km}$ . Aunque esta oscilación parece carecer de sentido, la inclusión de este parámetro en los modelos de regresión mejoró en todos los casos el coeficiente de regresión. MARTÍNEZ *et al.* (1999) también incluyen este parámetro en sus modelos, mejorando significativamente el ajuste.

En la sectorización del gradiente pluviométrico vertical los resultados no han sido tan satisfactorios. Para lograr los objetivos planteados ( $r^2 > 0,60$ ) fue necesario la delimitación de 22, 22, 18 y 19 sectores para primavera, verano, otoño e invierno respectivamente. En general, los coeficientes de correlación ( $r^2_{\text{medio}} = 0,79$ ) son inferiores a los obtenidos en el caso de las temperaturas y hay, en todos los trimestres, ciertas estaciones con comportamiento anárquico que no se ajustan a la variación de este parámetro en las estaciones vecinas. Alrededor de estas estaciones se delimitaron sectores circulares independientes de 3 Km de radio, donde la estimación de precipitaciones se realiza directamente sin ninguna corrección altitudinal. El gradiente pluviométrico vertical medio es de 37 mm trimestrales/ 100 m de desnivel, siendo mayor en Otoño e Invierno (61 y 53 mm trimestrales/100m respectivamente) y mínimo en verano (16 mm trimestrales/100m). En ciertos sectores, las precipitaciones disminuyen al subir en altitud, posiblemente debido a un efecto de sombra pluviométrica de una cadena montañosa previa.

La estimación mediante el modelo propuesto de las precipitaciones mensuales del año 1996 en las estaciones meteorológicas ha supuesto una importante mejora respecto a la estimación de éstas según la precipitación en la estación más próxima (Tabla 1). El error relativo medio se reduce utilizando el modelo desde el 46% hasta menos del 10%. Esta mejora se produce en todos los meses, siendo especialmente notoria en los meses centrales del año donde el error se reduce desde más del 80% a menos del 5%. El porcentaje de estimaciones extremadamente erróneas (error relativo  $> 100\%$ ) también se reduce, pasando de cerca del 8% de casos con errores extremos en la estimación a partir de la estación vecina, a menos del 1% utilizando el modelo.

Tabla 1: Media, desviación estándar y porcentaje de casos extremos de los errores relativos de estimación de las temperaturas y precipitaciones mensuales del año 1996 en las estaciones meteorológicas según el modelo propuesto y a partir de la estación vecina más próxima.

MES	Precipitaciones				Temperaturas			
	por MODELO		por vecina		por MODELO		por vecina	
	Error	% errores	Error	% errores extremos	Error	% errores	Error	% errores

	med±std (%)	extremos (1)	med±std (%)	(1)	med±std (%)	extremos (2)	med±std (%)	extremos (2)
E	15,7±24,7	1,4	25,8±24	1,3	15,7±24,7	4,5	16,1±27,4	5,1
F	19,9±28,6	1,4	33,9±43,6	5,9	19,9±28,6	9,0	18,8±19,4	9,0
M	10,6±11,2	0	30,1±44,1	2,6	10,6±11,2	2,7	10,5±10,0	0
A	6,5±6,5	0	51,0±72,4	8,7	6,5±6,5	0	8,8±8,4	0
M	6,1±6,3	0	40,5±72,1	7,8	6,1±6,3	0	7,8±8,4	0
J	5,3±7,5	0	88,3±118	17,3	5,3±7,5	0,9	5,9±5,5	0
J	4,8±4,7	0	89,5±213	16,1	4,8±4,7	0	7,4±7,6	0
A	5,4±7,0	0	52,7±106	6,5	5,4±7,0	0	8,3±10,0	0
S	5,2±5,4	0	36,6±70,4	5,3	5,2±5,4	0	9,2±10,3	1,3
O	8,0±10,7	0	33,5±47	3,9	8,0±10,7	1,8	12,6±14,8	5,1
N	8,3±8,7	0	38,3±85,9	7,2	8,3±8,7	0	11,1±9,9	1,3
D	12,6±19,5	1,4	37±57,2	5,2	12,6±19,5	3,6	17,1±21,2	5,1
Anual	9,0±14,7	0,3	46,4±94,0	7,9	9,0±14,7	1,9	11,2±14,7	2,2

Casos extremos: errores relativos mayores del 100% en precipitaciones <sup>(1)</sup> y del 50% en temperaturas <sup>(2)</sup>

Las mejoras en la estimación de las temperaturas no es tan notable (Tabla 1). Utilizando la estación meteorológica más próxima y el gradiente térmico vertical estándar (-0,55°C/100m), el error relativo medio de la estimación de las temperaturas mensuales de 1996 es del 11,2 %. Aplicando la sectorización y gradientes propuestos el error es del 9%. A su vez el número de estimaciones extremadamente erróneas tampoco disminuye excesivamente, pasando del 2,2 % al 1,9% de las estimaciones realizadas.

En conclusión, el modelo parece mejorar la estimación de las temperaturas y precipitaciones mensuales y se muestra como una herramienta práctica y útil para el gestor forestal. Sería conveniente comprobar su eficacia en cada sector y calcular los errores medios de cada zona, lo que serviría como una estimación de la bondad de la estimación en cada caso concreto. Por otra parte para una verificación más rigurosa sería necesario utilizar estaciones meteorológicas no incluidas en el modelo. A su vez, la existencia de estaciones que se comportan marcadamente distinto a sus vecinas resta versatilidad al modelo ya que alrededor de éstas no se puede estimar las temperaturas y precipitaciones más que con la metodología convencional. A falta de una depuración, la programación del modelo en ArcView puede ser de gran utilidad para los forestales gallegos.

## REFERENCIAS

- AGUILÓ, A.M., ARAMBURU, M.M.P., AYUSO, C.E., BLANCO, A.A., CALATAYUD, P.T., CEÑAL, G.M.A., CIFUENTES, V.P., ESCRIBANO, B.R., FRANCÉS, A.E., GLARÍA, G.G., GONZÁLEZ, A.S., LACOMA, M.E., MUÑOZ, R.C., ORTEGA, H.A.C., OTERO, P.I., RAMOS, F.A. & SÁIZ, O.M.G.; (1991). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico: Contenido y Metodología*. Madrid: Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transportes. 572 pp.
- CARBALLEIRA, A., DEVESA, C., RETUERTO, R., SATINLLAN, E. & UCEDA, F.; (1983). *Bioclimatología de Galicia*. A Coruña: Ed. Fundación Pedro Barrié de la Maza. Conde Fenosa. 591 pp.
- ELÍAS, C.F. & CASTELLVI, S.F.; (1996). *Agrometeorología*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa. 518 pp.
- GRIFFITH, D.A. & AMRHEIN, C.G.; (1997). *Multivariate statistical analysis for geographers*. New Jersey, USA: Prentice Hall. 192 pp.
- MARTINEZ, C.A., CASTILLO, R.F. & PÉREZ, A.A.; (1994). *Factores que influyen en la precipitación y el balance de agua en Galicia*. Boletín de la A.G.E., 18: 79-96.

MARTÍNEZ, C.A., PÉREZ, A.A., CASTILLO, R.F., VALCARCEL D.M. & BLANCO, C.R.; (1999). *Atlas climático de Galicia*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia.

SAS; (1990). *SAS Language: Reference, Version 6*. First Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc. 1042 pp.